

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04153

研究課題名（和文）高精度音場可聴化プラットフォームの構築 -後期残響音モデルと発音者による音場評価-

研究課題名（英文）High-precision sound field auralization platform - late reverberation model and evaluation by performer

研究代表者

大谷 真 (Otani, Makoto)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40433198

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：音声や音楽などの音を介したコミュニケーションは、我々が生活を営む上で重要な情報伝達手段であり、様々な生活空間において適切に音を伝えることが可能な音環境を構築するためには、あたかも聴取者がその空間に存在しているかのように聴覚情報を提示する可聴化が有用である。本研究では、物理的性状及び聴感への影響について不明な点が多い後期残響音についてその分析及びモデル化手法の構築、及び、話者や演奏者の観点での自発音可聴化システムの構築を試みた。本課題では、確率論的見地から後期残響音の分析・モデル化・評価を行うための理論基盤を構築するとともに、自発音可聴化システムを構築し十分な性能を有していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で構築した後期残響音の分析・モデル化の理論は、後期残響音という確定論的アプローチで扱うには複雑すぎる物理現象を扱うための確率論的アプローチの基礎となるものであり、学術的な意義が大きい。また、本課題で構築した自発音可聴化システムをさらに高精度化していくことで、発話者・演奏者の観点から音環境に関わる物理量及び心理的メカニズムを探求することが可能となる点に学術的な意義を有するとともに、コンサートホール等の設計において演奏者の観点からのフィードバックを提供することが可能なツールとなり得るためより良い音環境の実現に貢献できるという点に社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）：Communications via sounds such as speech and music are important in our daily life. To realize acoustic environments in which we can appropriately communicate using sounds in various spaces, so-called auralization, which enables a virtual presentation of auditory information as if a listener exists in those spaces, is effective. This study attempted to construct an analysis and modeling method of late reverberation, whose physical characteristics and perceptual effects are yet to be revealed and to develop an auralization system for a speaker or music performer. As a result, the study established a theoretical basis for analysis, modeling, and evaluation of late reverberation from a statistical approach. In addition, an auralization system for performers was developed with sufficient performance.

研究分野：建築音響学

キーワード：室内音場 可聴化 臨場感コミュニケーション 聴覚バーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

音声や音楽などの音を介したコミュニケーションは、我々が生活を営む上で重要な情報伝達手段であり、講演用/音楽用ホール、教室や保育施設といった教育環境、オフィスなどの労働環境、などの様々な生活空間において、適切に音を伝えることが可能な音環境を構築することは豊かな生活・社会を実現する上で極めて重要である。

より良い音環境の実現を目的として、これまで多くの音響心理量、例えば音声の明瞭性、残響感、音像の拡がり、といった音の響き方に関わる心理量及びそれに対応する室内音響特性の物理指標が提案されてきたが、特に音場が有する空間情報も含めた室内の音の響きの知覚の機序は複雑であり、特定の心理量に対応した物理指標の最適化が必ずしも総体としての音環境の最適化に繋がらないという問題があった。一方で、計算機による音場シミュレーションと立体的な聴覚空間を仮想的に呈示する立体音響収録・再生技術を統合することで、任意のシミュレーション空間内の音場をその空間情報を含めて、あたかも聴取者がその空間に存在しているかのように聴覚情報を呈示する「可聴化」[1]が研究されている。高精度な可聴化が実現されれば、設計段階において室内音環境の心理的評価を行うことが可能となり、その結果を設計にフィードバックすることでより良い音環境の構築に貢献できると期待される。しかし、計算機性能の発展により音場シミュレーションで室内音場を高精度に予測することが可能になりつつあるものの、音場予測及び可聴化には下記の2つの課題が存在している。

### (1) 後期残響音の到来方向分布の分析・モデル化

計算機による音場シミュレーションの手法は主に音波の波動性を無視して実行速度を高めた幾何音響理論と波動方程式を支配方程式として高精度であるが膨大な計算機資源を要する波動音響理論のどちらかに基づく。室内で生じる反射音は直接音からの経過時間により初期反射音と後期残響音に区別され、後期残響音は音の包まれ感 (LEV: listener envelopment) [2]の知覚に影響があるとされている。幾何音響理論では後期残響音を正確に予測することは困難であり、また、波動音響理論では特に中～大規模な音楽ホールなどの大空間を対象とした計算は現状では難しく、また、将来的に大規模空間の計算が可能となったとしても、後期残響音を正確に予測できるかは不明である。そのため、現状では後期残響音の予測において、完全拡散音場を仮定して統計的に音場を扱う残響理論が利用されているが、実際の音場が理想状態である完全拡散音場となることはない。実際に、後期残響音も初期反射音と同じくその到来方向が偏った空間分布を示すことが指摘されているが、後期残響音の到来方向分布の分析手法が確立されておらず、そのため室形状や音源位置、受音位置と後期残響音の空間分布の関係も不明であり、したがって、空間印象知覚に与える心理的影響についても未知の部分が多く残されているのが現状である。

### (2) 発音者のための音場可聴化

室内の音環境において、人が主に聴取する音は、他者が発した音(他発音)と自身が発した音(自発音)である。発音者は自ら発した音の室内環境からの反射音を聴取することになるが、発音者の聴取については、遅延聴覚フィードバックにより発話者の話速が低下することや、楽器奏者、歌唱者、発話者といった発音者が自ら発した楽器音、歌声、音声の反射音を知覚することで演奏、歌唱、発話の仕方を調整すること、などが知られており、より良い音環境を実現するためには設計段階における発音者の観点からの評価が必要である。しかし、発音者のための可聴化に関する研究は申請者が実施してきた研究を含めて数例しかなく、設計段階において発音者の立場から主観的評価を行える高精度な可聴化システムの実現には至っていない。したがって、設計段階において発音者の観点で音環境の評価を行うためのツールが存在せず、前例と音響設計者の職人的勘に頼った、あるいは、発音者の観点が欠落した設計が行われている。

## 2. 研究の目的

前項で述べた2つの課題に対して、A) 後期残響音の到来方向の分析を行うことで、これまで不明であった後期残響音の到来方向の物理的性状を明らかにし、後期残響音をモデル化することで、空間的特性を含めた後期残響音の効率的な予測手法を確立し、B) 発音者が発した音を可聴化するシステムを開発することで、発音者の観点に立った評価手段としての可聴化システムを開発する。これら2つのサブテーマの実施により、後期残響音を含めて高精度かつ効率的に音場を予測し、かつ、発音者自身が空間情報を含めた音場を体験しこれを評価することを可能とする音場可聴化プラットフォームの構築を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの項目(1)～(3)を実施する。

#### (1) 後期残響音の到来方向分布の分析・モデル化

球状マイクロホンアレイを用いた平面波展開による反射音到来方向の空間分布測定手法を構築し、実際のコンサートホールなどにおける後期残響音の到来方向の測定結果から、室形状や音源位置・受音位置と到来方向分布の関係を分析することで、これらをパラメータとして到来方向分布を含めた後期残響音のモデル化を行う。

##### 後期残響音の到来方向分布の測定法の確立

球状マイクロホンアレイを用いてインパルス応答を測定し、この結果に球面調和展開を施して平面波展開を行うことで、反射音の到来方向分布を分析する手法を確立する。

##### 後期残響音の到来方向分布の分析

で確立した測定法を用いて、様々な空間における残響音の到来方向分布を測定し、後期残響音の到来方向分布と室形状、音源位置、受音点との関連を明らかにする。

##### 後期残響音のモデル化

で明らかにする後期残響音の物理的性状に基づいて、到来方向分布を含めた後期残響音のモデル化を行う。モデル化に際しては、従来の音場シミュレーションの予測結果に容易に統合できる形でこれを行い、可聴化に即座に適用可能なモデル表現について検討を行う。また、構築したモデルの妥当性について検証を行う。

#### (2) 発音者のための可聴化システムの構築

本研究では、空間情報を含めた音場の情報取得及び再生のための基本理論として、球面調和関数展開を利用した高次アンビソニクス (HOA: Higher-Order Ambisonics) 理論[3]を用いる。発音者のための可聴化システムで用いる再生系として、HOA 理論に基づいたスピーカアレイ再生系と、これにさらにバイノーラル合成を適用した仮想 HOA によるヘッドホン再生系の2つを構築する。さらに、シミュレーション空間内での仮想 HOA 収録のために、実空間で一般的に用いられる球状マイクロホンアレイではなく、ある程度任意の空間位置に設置された受音点群での音圧情報から仮想 HOA 収録を行う自由度の高い理論を構築する。

##### 再生システムの構築

可聴化における再生システムでは、音場再現理論に基づいたスピーカアレイ再生、そして、スピーカアレイ再生におけるスピーカ-両耳間の音響伝搬を計算機で模擬したヘッドホン再生、の2つの再生方式を採用する。後者についてはヘッドホン再生と発音者が発する音のマイクロホン収録の間に音響ループが生じないため、申請者がこれまで開発してきた他発音のための可聴化システムを即座に適用可能である。一方、スピーカアレイ再生の場合には、スピーカ-マイクロホン間の音響ループによりハウリングが生じる可能性があるため、ハウリングフリーな収録・再生系について検討を行う。

##### 非球状仮想マイクロホンアレイによる HOA 収録理論の構築

本研究では、音場の音波の到来方向も含めて音場の情報を取得する手法として、HOA 理論に基づいた球状マイクロホンアレイによる収録手法が提案されており、実空間を対象としてこれを再現する場合には、同様の手法を用いることができる。シミュレーション空間においても球面状に仮想的に配置された受音点群を配置することで同様の方法により仮想収録が可能であるが、シミュレーション空間では球面状の受音点配置にこだわる必要はない。そこで、任意の位置に受音点を大量に設定可能なシミュレーションの利点を活かしつつ HOA 理論に適用可能な手法の理論構築を行う。

#### (3) 可聴化システムの統合及び性能評価

(1)で構築した後期残響音モデルと(2)で構築した可聴化システムを統合し、発音者のための可聴化システムの高精度化を行い、物理的再現精度の確認と心理物理実験による性能評価を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 後期残響音の到来方向分布の分析・モデル化

球状マイクロホンアレイによるインパルス応答測定結果に対して、平面波展開と減衰除去を適用することで、反射音到来方向の空間分布の測定及び分析手法を構築した。また、これを用いて実際のホールなどにおける測定及び幾何音響シミュレーションによる計算結果に後期残響音の到来方向の分析を行うことで、後期残響音の到来方向分布と室形状、音源位置、受音店との関連の一端を明らかにした。

また、後期残響音のモデル化に関する検討を行い、モデル化の基本となる平面波による擬似完全等方音場の合成手法を構築した。そして、擬似等方音場モデルをさらに発展させ、離散的に表現された音場における完全等方音場モデル及び音場の等方性を評価するための指標を考案することで、任意の後期残響音のモデル化のための理論基盤を構築した。

#### (2) 発音者のための可聴化システムの構築

可聴化における再生システムとして HOA 理論に基づいたスピーカアレイ再生を採用し、実際に用いる 64ch スピーカアレイを構築した。構築した再生システムを用いることで、発音者に対してその自発音の室内反射音を 9.8 ms の遅延で提示することが可能であり、床からの反射音以降に到来する反射音であれば適切に提示可能であることを確認した。一方で、多チャンネル再生システムにおけるハウリングを抑制するためには、再生システムにより再生される反射音の信号ゲインを実際よりも小さく設定する必要があるという問題が生じた。これを解決するためにハウリングキャンセラをシステムに組み込み、ハウリングを一定量抑制することが可能となった。一方で、システムで再現する所望音場の性質（残響時間など）によってはハウリングを完全に排除することが困難であり、これを抑制するためには実際の音場よりも反射音の音圧レベルを小さく出力しなければならないケースがあることが分かった。

実空間において空間情報を含めた音場の情報を取得する手法として、球状マイクロホンアレイによる収録手法が提案されており、本研究でもこれを用いるが、シミュレーション空間では球面状の受音点配置にこだわる必要はないため、重力波の測定において提案された Misner 法[4]を音場に適用することで、時間領域有限差分法などで採用される直交グリッドに配置された受音点群から HOA 理論での仮想収音を可能とする手法の理論構築を行った。また、Misner 法に基づいた手法に加えて、音場の極座標表現において現れる動径関数の変換により直交グリッド上で仮想収音を行う手法についても検討を行い、両者が同等の性能を有することを明らかにした。また、同様の発想に基づいて、直交グリッドによる音響数値シミュレーション空間内で任意の放射指向性を有する音源を再現する手法を提案した。

### (3) 可聴化システムの統合及び性能評価

(1)で構築した後期残響音モデルと(2)で構築した可聴化システムの統合を行い、聴取者自らが発した音声や楽器音などに室内で生じる音響的フィードバック、すなわち、聴取者が発した音に対する質の初期反射音及び後期残響音を仮想敵に聴取可能とする可聴化システムを構築した。構築した可聴化システムでは、聴取者が発した音の音響的フィードバックを 9.8 ms の遅延で聴取者に提示することが可能であり、例えば床などから到来する極初期の反射音以降に到来する反射音及び残響音を適切に提示可能であることを明らかにした。一方で、(2)でのハウリング抑制における課題が完全には解決されなかったため、特に残響音のエネルギーの大きい空間を対象とする場合、すなわち残響時間が長い空間を対象として可聴化を行う場合にはハウリング発生を回避するために反射音の音圧レベルを実際よりも小さくする必要があることが分かった。

#### < 引用文献 >

- [1] M. Kleiner, B-I, Dalenbäck, P. Svensson, "Auralization-An Overview," J. Audio Eng. Soc. 41(11), 861-875 (1993).
- [2] J.S. Bradley, G.A. Soulodre, "Objective measures of listener envelopment," J. Acoust. Soc. Am. 98, 2590-2597 (1995).
- [3] M.A. Poletti, "Three-dimensional surround sound systems based on spherical harmonics," J. Audio Eng. Soc. 53, 1004-1025 (2005).
- [4] C.W. Misner, "Spherical harmonic decomposition on a cubic grid," Class. Quantum Grav. 21(3), S243 (2004).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Tanaka Tatsuhiro, Otani Makoto	4. 巻 -
2. 論文標題 An isotropic sound field model composed of a finite number of plane waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kiridoshi Arina, Otani Makoto, Teramoto Wataru	4. 巻 12
2. 論文標題 Spatial auditory presentation of a partner's presence induces the social Simon effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-09628-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takada Yuki, Otani Makoto	4. 巻 88
2. 論文標題 側方あるいは上下方向から到来する初期反射音による上下及び水平方向への音像の拡がり	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 243 ~ 254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.88.243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takada Yuki, Otani Makoto	4. 巻 43
2. 論文標題 Precedence effect and related phenomena in the median plane for short time delay	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 50 ~ 56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.43.50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Ryo, Otani Makoto	4. 巻 150
2. 論文標題 Binaural-centered mode-matching method for enhanced reproduction accuracy at listener's both ears in sound field reproduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3838 ~ 3851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0007226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Tatsuhiro, Otani Makoto	4. 巻 42
2. 論文標題 Approximating an isotropic sound field as a composition of plane waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 286 ~ 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.42.286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Izumi Yuto, Otani Makoto	4. 巻 176
2. 論文標題 Relation between Direction-of-Arrival distribution of reflected sounds in late reverberation and room characteristics: Geometrical acoustics investigation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 107805 ~ 107805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apacoust.2020.107805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Tatsuhiro, Otani Makoto	4. 巻 42
2. 論文標題 Impacts of direction of arrival of direct sound and late reverberation on listening difficulty ratings of speech signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 58 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.42.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okumura Hiraku, Otani Makoto	4. 巻 42
2. 論文標題 Numerical investigation of sweet spot size in a sound field reconstruction system based on inverse filtering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 116 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.42.116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Izumi Yuto, Otani Makoto	4. 巻 176
2. 論文標題 Relation between Direction-of-Arrival distribution of reflected sounds in late reverberation and room characteristics: Geometrical acoustics investigation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 107805 ~ 107805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apacoust.2020.107805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Tatsuhiro, Otani Makoto	4. 巻 未定
2. 論文標題 Approximating an isotropic sound field as a composition of plane waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Tatsuhiro Tanaka, Makoto Otani
2. 発表標題 A rotationally-invariant isotropy measure for directional room impulse response
3. 学会等名 International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Matsuda, Yuki Kawasaki, Makoto Otani
2. 発表標題 Multizone sound field reproduction with direction-of-arrival-distribution-based regularization and its application to binaural-centered mode-matching
3. 学会等名 International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川晃史, 大谷 真
2. 発表標題 外部音場解析解を用いたFDTD法への音源の放射指向性の導入
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中達宏, 大谷 真
2. 発表標題 音場の拡散性に関する数理統計的検討
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中筋晴子, 大谷 真
2. 発表標題 水平及び上下方向に角度をもつ方向からの反射音による先行音効果
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 川崎悠季, 大谷 真
2. 発表標題 原音場における音波の到来方向分布を考慮した正規化モードマッチング法
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中達宏, 大谷 真
2. 発表標題 球面デザインを用いた等方音場のモデル化
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎悠季, 大谷 真
2. 発表標題 解析的手法に基づくスピーカ出力制約付きモードマッチング法
3. 学会等名 電子情報通信学会応用音響研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎悠季, 大谷 真
2. 発表標題 両耳を中心とするH0A再生における頭部運動への追従手法の検討
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中達宏, 大谷 真
2. 発表標題 平面波モデルに基づいた近似的等方音場の生成
3. 学会等名 日本音響学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎悠季, 大谷 真
2. 発表標題 両耳を中心としたマルチゾーンH0A再生に基づくバイノーラル合成の性能評価
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中達宏, 大谷 真
2. 発表標題 直接音および後期残響音の空間分布と音声の明瞭性との関係について
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田有紀, 大谷 真
2. 発表標題 正中面における先行音効果に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会聴覚研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Izumi, Makoto Otani
2. 発表標題 Direction-of-arrival distribution analysis of late reverberation using spherical microphone array
3. 学会等名 Proc. International Symposium on Room Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡良憲, 大谷 真
2. 発表標題 ミスナー法を用いた球面調和係数の推定に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泉 悠斗, 大谷 真
2. 発表標題 後期残響音における反射音到来方向と室の条件との関連性について
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡 良憲, 大谷 真
2. 発表標題 ミスナー法を用いた格子点音圧からの球面調和展開に関する研究
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松岡良憲, 大谷 真
2. 発表標題 ミスナー法を用いた格子点音圧データからの球面調和係数の推定
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Rochester Institute of Technology		